

Tartu Ülikool
Loodus- ja täppisteaduste osakond
Ökoloogia ja maateaduste instituut
Geograafia osakond

Bakalaureusetöö geograafias (12 EAP)

**Tornaadode teke ja elutsüklid Eestis lähtuvalt
radariandmetest**

Tarmo Tanilsoo

Juhendajad:
Tanel Voormansik MSc
prof Jaak Jaagus

Tartu 2023

Annotatsioon

Tornaadode teke ja elutsükel Eestis lähtuvalt radariandmetest

Töö eesmärk on analüüsida kvalitatiivselt Keskkonnaagentuuri radarivõrgu poolt kogutud andmeid Eestis aastatel 2019 kuni 2022 (k.a.) aset leidnud tornaadode ajal ning koostada näidete kogu, mida võiks kasutada ka operatiivselt äikesehoiatuste väljastamisel. Töö käigus leiti vähemalt neli juhtumit, kus tornaadoga oli kaasnenud mesotsüklon, mistõttu oli pöörlemise signatuur radariandmetes tuvastatav. Samuti leiti üks juhtum kus radar võis tuvastada ka tornaado poolt üles tõstetud prahti, kuid selle osas jäädi ebakindlaks.

Märksõnad: ohtlikud ilmanähtused, tornaadod, meteoradarid

CERCS kood: P510 Füüsiline geograafia, geomorfoloogia, mullateadus, kartograafia, klimatoloogia

Abstract

Development and lifecycle of tornadoes in Estonia based on radar data

The purpose of this thesis is to qualitatively analyse radar observations made by the radar network of Estonian Environmental Agency during tornado events that took place during years 2019 to 2022 and to create a set of examples that could be used also during operational work while issuing thunderstorm warnings. At least four cases of mesocyclonic tornadoes were identified. Additionally there was a one suspected case of tornadic debris signature, but for which there was insufficient confidence to classify it as such.

Keywords: severe weather, tornadoes, weather radars

CERCS code: P510 Physical geography, geomorphology, pedology, cartography, climatology

Sisukord

Sissejuhatus.....	4
1. Valdkonna ülevaade.....	6
1.1 Tornaadode definitsioon ja olemus.....	6
1.2 Tornaadod radariandmetes.....	7
1.3 Doppleri dilemma.....	10
2. Andmed ja meetodika.....	13
2.1 Andmed.....	13
2.2 Meetodika.....	14
3. Tulemused.....	16
3.1 7. juuli 2019.....	16
3.2 6. august 2019.....	17
3.3 11. august 2019.....	18
3.4 1. juuli 2020.....	20
3.5 21. juuli 2020.....	21
3.6 26. mai 2022.....	22
3.7 12. juuli 2022.....	22
4. Arutelu.....	27
Kokkuvõte.....	29
Summary.....	31
Tänuavaldused.....	34
Kirjanduse loetelu.....	35

Sissejuhatus

Esimesed teated tornaadode kohta Eestis ja Liivimaal pärinevad 18. sajandist (Tarand ja Kallis, 2017). Keskeltläbi leiab neid Eestis aset 2-3 korda aastas (Kiitsak, 2020), mõned neist võivad olla väga tugevad. Näiteks 15. juulil 2000 tabas Rakvere linna tornaado tugevusega F2-F3 Fujita-Pearsoni skaalal, mis tekitas linnas kahjustusi ning nõudis ka ühe inimelu (Tarand ja Kallis, 2017). Sellised juhtumid meenutavad, et ka Eestis on siiski tornaadod oluline teema. Kuigi tornaadode esinemise sagedus ja tüüpiline intensiivsus on Ameerika Ühendriikidega võrreldes Euroopas väiksem, nad siiski eksisteerivad ning on endiselt ohtlikud (Antonescu *et al.* 2017). Tornaadosid on ka Eestis varasemalt uuritud: Johannes Peter Letzmann (1885-1971) avaldas tornaadode kohta üle kolmekümne artikli, kogus ajaleheväljalõiked tornaadode kohta ning koostas muuhulgas juhendi tornaadovaatlusteks, samuti uuris tornaadosid Alfred Wegener (1880-1930) (Tarand ja Kallis, 2017). Suure panuse on teinud ka Heino Tooming (1930-2004), kes alates 1960. aastast kirjutas artikleid tornaadode teemal ning käivitas esimese äikesevaatlejate võrgu (sealsamas). Need tornaadouuringud on aga lähtunud klassikalistest meetodikatest ning Eestis tehtud ja Eestit puudutavaid radariandmestikule keskenduvaid tornaadourimusi teada ei ole. Mujal maailmas tehtud uuringud on näidanud, et radaritega on võimalik jälgida tornaadodega kaasnevaid mesotsükloneid (Burgess *et al.* 1975, *cit.* Brown *et al.* 1978) ning kaksikpolarimeetriliste radaritega ka nende poolt üles tõstetud prahti (Ryzhkov *et al.* 2002). Radarivaatluste puhul ei ole probleemiks ka olukord, kus tornaado leiab aset hajaasustusega piirkonnas ning puuduvad pealtnägijad, olulisemaks on pigem kaugus radarist.

18. mail 2020 uuendati Eestis kasutatavate kaksikpolarimeetriliste meteoradarite võrgustiku seadistust, mille tulemusena muutus võimalikuks maapinnalähedase õhukihi vaatlemine senisest oluliselt suurema ajalise lahutusega (Keskkonnaagentuur, 2020). Uue seadistusega oli võimalik sõltuvalt skaneeringust saada uus pilt senisest 3-6 korda sagedamini. Vana seadistuse puhul esines oht, et näiteks tornaado esinemine võib jääda kahe mõõtmistsükli vahele ning andmetes kajastuvad vaid need juhtumid, mis olid jälgitavad pikemat aega (nt. 11. augustil 2019). Sellest tulenevalt muutis 2020. aasta konfiguratsioonimuudatus radarivaatluste temaatika Eestis olulisemalt aktuaalsemaks, kuna nüüd tekkis võimekus vaadelda ka seda, mis oleks varem võinud jääda kahe skaneeringu vahele.

Töö eesmärgiks on analüüsida kvalitatiivselt aastatel 2019 kuni 2022 Eestis aset leidnud tornaadode ajal kogutud radariandmeid ning uurida, kas rahvusvahelises kirjanduses ilmunud teooria tornaadodega seotud radarisignatuuride kohta kehtib ka Eesti tingimustes. Eelkõige otsitakse töö käigus radarisignatuure, mis võivad viidata mesotsükloni esinemisele äikesepilves. Oodatavaks väljundiks on näidete kogumine, mida võiks tulevikus kasutada ka operatiivses töös äikesehoiatuste väljastamisel.

1. Valdkonna ülevaade

1.1 Tornaadode definitsioon ja olemus

Ameerika Meteoroloogia Selts defineerib tornaado kui kiiresti pöörleva õhusamba, mis ulatub vertikaalselt konvektsioonipilvest maapinnani. Harilikult on sellisel juhul nähtav ka lehterpilv, kuid see ei pea ulatuma nähtavalt maapinnale (American Meteorological Society, 2022e). Tornaadodega kaasnevad kohalikul skaalal väga tugevad tuule kiirused, mis võivad põhjustada väga tõsiseid kahjustusi. Näiteks 2013. aastal Ameerika Ühendriikide Oklahoma osariigis asuvat El Reno linna tabanud tornaados mõõdeti mobiilsete radaritega tuule kiiruseks enam kui 90 m/s (Wakimoto *et al.* 2016).

Eesti keeles kutsutakse tornaadosid ka trombideks (Eesti Keele Instituut, 2022b), kuid käesoleva töö ulatuses kasutatakse läbivalt sõna „tornaado“. Ehkki sõnad „tornaado“ ja „tromb“ on sünonüümid, loob sõna „tromb“ kasutus autori hinnangul soodsa pinnase eksiarvamusteks nagu oleksid nt. Euroopas esinevad tornaadod olemuslikult erinevad tornaadodest, mis leiavad aset Ameerika Ühendriikide preeriavööndis. Näide sellise eksiarvamuse levimisest on Eesti Keele Instituudi Ühendsõnastik 2022, mis defineerib tornaado nõnda: „keeristormina liikuv õhukeeris (ehk tromb) Põhja-Ameerikas“ (Eesti Keele Instituut, 2022a). Samas ei sea Ameerika Meteoroloogia Seltsi definitsioon termini kasutamisele mingeid geograafilisi piire ning seetõttu on need kaks definitsiooni omavahel vastuolus. Seejuures ei ole eksiarvamused piiratud ainult Eestiga. Antonescu *et al.* on kirjeldanud, kuidas mõnedes Euroopa riikides ei usutud veel 21. sajandi alguses, et neil võiks tornaadosid esineda (Antonescu *et al.* 2017). Samuti uuritakse tänapäeval tornaadosid Euroopas vähem, kui Ameerika Ühendriikides ning nende hulk on alahinnatud (sealsamas).

Nii Groenemejer ja Kühne kui ka Antonescu *et al.* on näidanud, et kõige enam teateid tornaadode kohta on tulnud kõrge rahvastikutihedusega Kesk-Euroopa riikidest – eriti Saksamaalt, Belgiast ja Prantsusmaalt (Groenemejer ja Kühne, 2014; Antonescu *et al.* 2017). Vähe on tulnud teateid piirkondadest, kus rahvastikutihedus on väike – näiteks Põhja-Skandinaavia (sealsamas). Samas on aga teadete hulk suurem Lõuna-Euroopa rannikualadel, kus on samuti rahvastikutihedus suurem ning esineb tornaadojuhtumeid, mis algasid Vahemerel vesipüksina ning siis randusid (sealsamas). Mõlematest artiklitest joonistus välja signaal, et lisaks rahva teadlikkuse tasemele mängib rolli ka see, kui tõenäoline on, et leidub keegi, kes midagi pealt näeb. Sellest tingitult on radarivaatlused oluline komponent, sest see ei eelda inimeste viibimist sündmuskohas ning konkreetseid

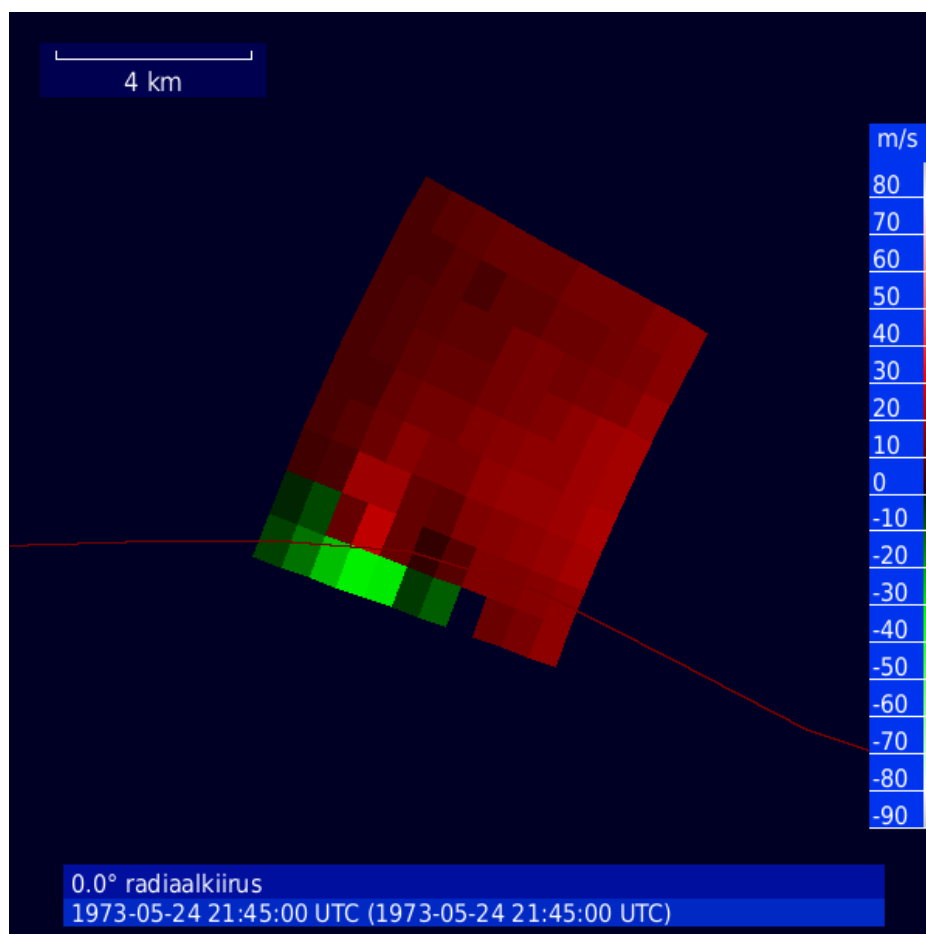
andmemustreid otsides on võimalik tuvastust automatiseerida. Mõnedes Euroopa riikides on seda ka tehtud, näiteks Saksa Ilmateenistusel on selleks kasutusel ka spetsiaalne algoritm (Hengstebeck *et al.* 2018).

Tüüpilised tornaadod on seotud mesotsükloniga – äikesepilves esineva 2-10 km läbimõõduga tsükloonaalselt pöörleva pööriseega (American Meteorological Society, 2022d). Just seda pöörist otsitakse ka selle töö raames radariandmetest – kui me räägime tornaado radarivaatlustest, siis peamiselt peamegi silmas, et radar jälgib selle ümber toimuvat pöörlemist äikesepilve sees, mitte keerist ennast. Tornaadost ise võime radariandmetes rääkida siis, kui radari vaatevälja ilmub selle poolt üles tõstetud praht ning tekivad karakteristikud signatuurid (nt. Ryzhkov *et al.* 2005). Leidub ka tornaadosid, millel mesotsüklon puudub. Neid kutsutakse kõnekeeles ka maapüksideks (American Meteorological Society, 2022a). Tavaliselt ei ole selline tornaado radaril mesotsükloni puudumise tõttu jälgitav – see oleks ainult siis võimalik kui see leiab aset radari vahetus läheduses ning tornaado poolt üles tõstetud praht ilmub radari vaatevälja. Ühte säärast tornaadot on pealt näinud ka autor ise (isiklik vaatlus ja videomaterjal). Vee kohal aset leidvaid tornaadosid nimetatakse vesipüksideks (American Meteorological Society, 2022e).

1.2 Tornaadod radariandmetes

Eestis kasutatakse atmosfääri seiramiseks kaksikpolarimeetrilisi pulssdopplerradareid (Keskkonnaagentuur a). Pulssdopplerradari põhimõte seisneb raadiosignaali välja saatmises, mis peegelduvad tagasi erinevatelt atmosfääris olevatelt hüdrometeoridelt ja muudelt objektidelt. Raadiosignaale ei saadeta pidevalt, vaid jäetakse ka ajaline vahemik peegelduste „kuulamiseks“. See, kui võrd tihedalt impulsse saadetakse, defineerib ka maksimaalse kauguse radarist, mida on võimalik seirata ilma, et peegelduste osas tekiks ebaselgus (ingl k. *range folding*) (The COMET® Program). Kaksikpolarimeetrilisus tähendab, et seiret teostatakse üheaegselt nii horisontaal- kui ka vertikaalpolarisatsioonides. Peegelduste iseloomu erinevus eri polarisatsioonide vahel võimaldab muuhulgas määrata peegeldava objekti kuju (Keskkonnaagentuur a). Lisaks on võimalik Doppleri efekti kasutades hinnata tuule kiirust radarikiire suhtes, sest tagasi peegeldunud radioimpulsi sagedus on peegeldava hüdrometeoori liikumise tõttu mõnevõrra muutunud (sealsamas). Tegemist on elektromagnetlainete analoogiga efektile, mida võib kohata tänaval näiteks kiirabiauto möödumisel kui sireen on lähenedes kõrgema helisagedusega kui eemaldudes (NOAA National Weather Service).

Üks varasemaid tornaadode radarivaatlusi pärineb 1953. aastast kui Stout ja Huff teatasid, et Illinoisi osariigi veeteenistuses õnnestus nende poolt kasutatava ilmaradariga vaadelda tornaadot põhjustanud äikesepilvi, muuhulgas pandi tähele äikesepilve radarikaja spiraalset kuju (Stout ja Huff, 1953). Seda kujutist nimetatakse samuti „konksukajaks“ (Fujita, 1958; Sadowski, 1960) selle konksulaadse välimuse tõttu. Täiendava võimekuse tornaadode vaatlemiseks lisas dopplerradarite kasutuselevõtt. Smith ja Holmes mõõtsid pidevlainedopplerradarit kasutades 10. juunil 1958 Ameerika Ühendriikide Kansase osariigis asuvat El Dorado linna tabanud tornaados tuule kiiruseks 92,1 m/s (Smith ja Holmes, 1961). Samas ei võimaldanud Smithi ja Holmesi kasutatud süsteem määrata oma ülesehitusest tulenevalt konkreetsete tuulekiiruste asukohta ning võimaldas vaid tuvastada suhteliste tuulekiiruste jaotust piki radarikiirt. Seetõttu kasutati mõõtmiste käigus täiendavalt tavalist pulssradarit, mille andmete abil juhiti dopplerradari antenn potentsiaalse tornaado suunas (sealsamas). Järgmine arenguhüpe oli pulssdopplerradarit kasutades tornaadokeerise signatuuri avastamine (Burgess *et al.* 1975, *cit.* Brown *et al.* 1978), kui 24. mail 1973 leidis aset tugev tornaado (Brown *et al.* 1978), mille radariandmetes esines nn. tuultepaar (*couplet*), mis on kujutatud joonisel 1.



Joonis 1. Äikesepilve liikumise suhtes normeeritud suhtelised tuule kiirused Oklahoma osariigis Normanis asunud radari suhtes 24. mail 1973 kell 15:45 kohaliku aja järgi (21:45 UTC). Andmed

on digiteeritud ja visualiseeritud Brown *et al.* 1978 põhjal. Antenni täpne kaldenurk ja skaneeringu algus sekundi täpsusega ei ole teada. Radari asukohaks on eeldatud praeguse Normani radarijaama asukoht.

Punased värvid joonisel tähistavad tuule kiirust radarist eemale (positiivsed väärtused), rohelised värvid aga tuule kiirust radari suunas (negatiivsed väärtused). Andmelõigu servas on näha, kuidas kõrvuti asetsevad nii kiiruskomponendid radarist eemale, kui ka radari poole, seejuures on üleminek vastassuunda ühes punktis äkiline (heledad rohelised pikslid pildi servas kõrvuti heledate punaste pikslitega). Sellises punktis, millest radarikiire kulgemise suuna suhtes paremal on tugev kiiruskomponent radarist eemale ja vasakul radari poole, ongi tornaadokeerise signatuur.

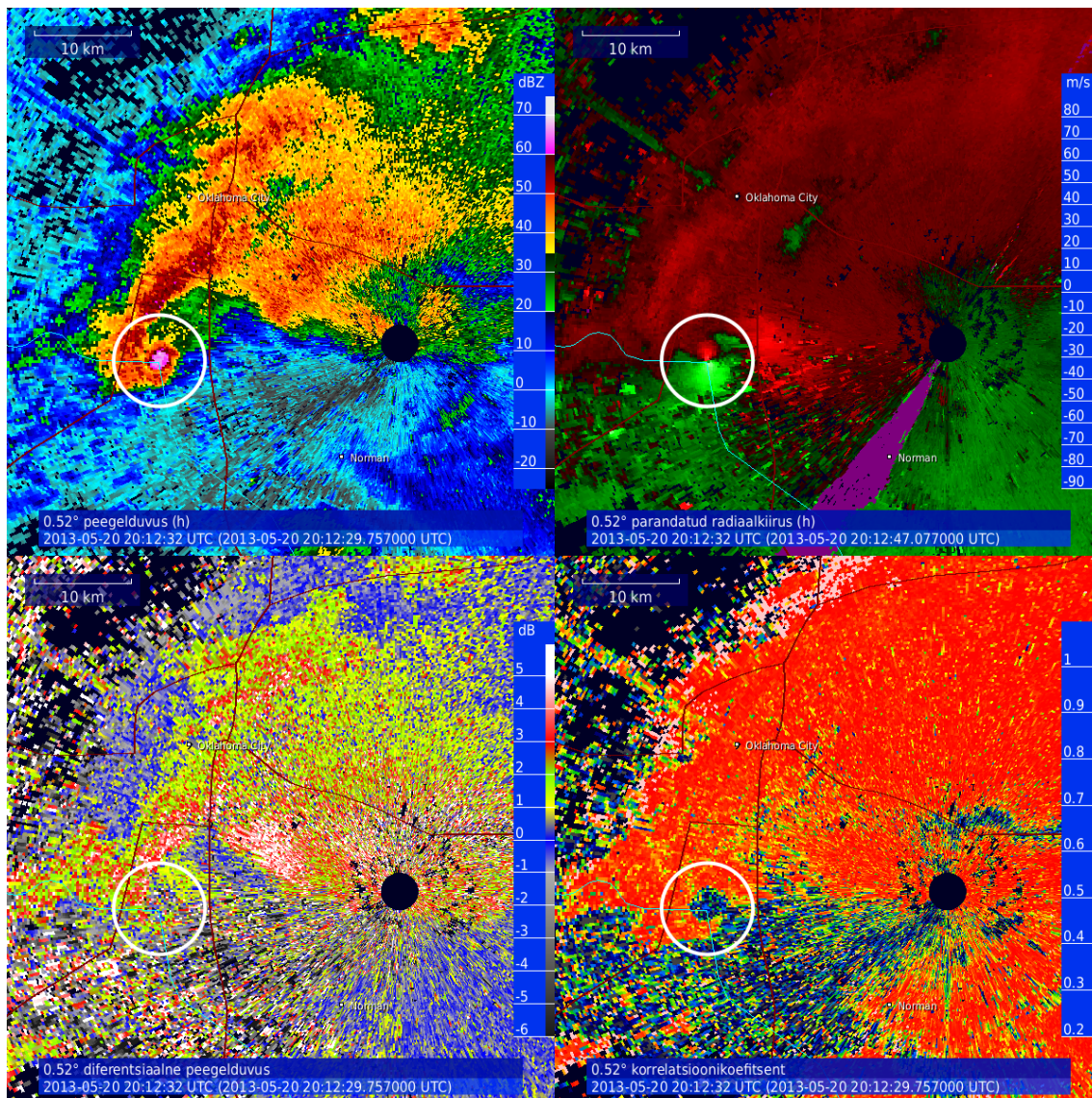
Järgmine samm edasi tornaadode ja nendega kaasneva üldisema pöörlemise vaatlemisel saabus kaksikpolarimeetriliste radaritega. Ryzhkov *et al.* vaatlesid 3. mail 1999 Ameerika Ühendriikide Oklahoma osariigis aset leidnud F5 tornaado ajal kaksikpolarimeetrilise radariga ning identifitseerisid polarimeetrilisi signatuure, millega tuvastada tornaado poolt üles tõstetud prahti. Eelkõige osutusid selle eesmärgi saavutamisel kasulikuks kahe polarisatsiooni vahelise peegeldusfaktorite vahe Z_{DR} ning polarimeetiline korrelatsioonikordaja ρ_{HV} . Kasutatava radari andmetes paistis tornaado poolt ülestõstetud praht välja nullilähedase Z_{DR} ning ebatavaliselt madala ρ_{HV} väärtusena (Ryzhkov *et al.* 2002). Selle põhjal on Ryzhkov *et al.* sõnastanud tornaadoprahisignatuuri definitsiooni, mis sisaldab järgmisi kriteeriume:

- konksukaja olemasolu
- selge keerise signatuur radiaalkiiruse andmetes
- peegelduvusfaktor suurem kui 45 dBZ
- ρ_{HV} väiksem kui 0,8
- Z_{DR} väiksem kui 0,5 dB

(Ryzhkov *et al.* 2005)

Joonisel 2 on esitatud võrdlus konksukaja, tornaadokeerise signatuuri ning polarimeetriliste karakteristikute vahel 20. mail 2013 aset leidnud EF-5 tornaado näitel kasutades USA Rahvusliku Ilmateenistuse Oklahoma osariigis Normanis asunud radari andmeid (National Weather Service Radar Operations Center, 1991). Joonisel on ringiga tähistatud tornaado asukoht, mis asub ringi keskel. Esiteks on joonisel võimalik täheldada konksutaolist kaja, kusjuures konksu otsas esinevad tugevad peegelduvused üle 60 dBZ. Tugevate peegeldustega samas asukohas asub ka selge tuultepaar. Z_{DR} vaates on samuti tornaado keerise keskme ümbruses võimalik leida Ryzhkovi

kriteeriumi rahuldavaid piksleid, isegi kui nad ei paista nii selgelt kui ρ_{HV} andmetes, kus tuulte paari ning tugevate kajadega samas kohas asetseb kettakujuline väga madalate (alla 0,5) väärtuste vahemik. Konkreetse juhtumi puhul ongi tegemist selge tornaadoprahisignatuuri juhtumiga, mis tornado tugevusest tingituna on hästi välja joonistunud.



Joonis 2: Peegelduvusfaktor, parandatud radiaalkiirus, Z_{DR} ja ρ_{HV} 20. mail 2013 kell 20:12 UTC USA Rahvusliku Ilmateenistuse Normani radarijaama andmetel.

1.3 Doppleri dilemma

Ka Eestis on kaksipolarimeetrisel radarid kasutusel, kuid erineb lainela. Ameerika Ühendriikide NEXRAD võrgustik kasutab seireks 10 cm lainela (National Weather Service Radar Operations Center, 2022), samas Eestis kasutatakse 5 cm lainela (Keskkonnaagentuur b). See tekitab aga

väljakutseid näiteks tuule kiiruste mõõtmisel. Maksimaalne mõõdetav tuule kiirus (Nyquisti kiirus) sõltub radari konfiguratsioonist ning lainealast, avaldades valemiga

$$v_{max} = \frac{\lambda}{4T} \quad (\text{American Meteorological Society, 2022c})$$

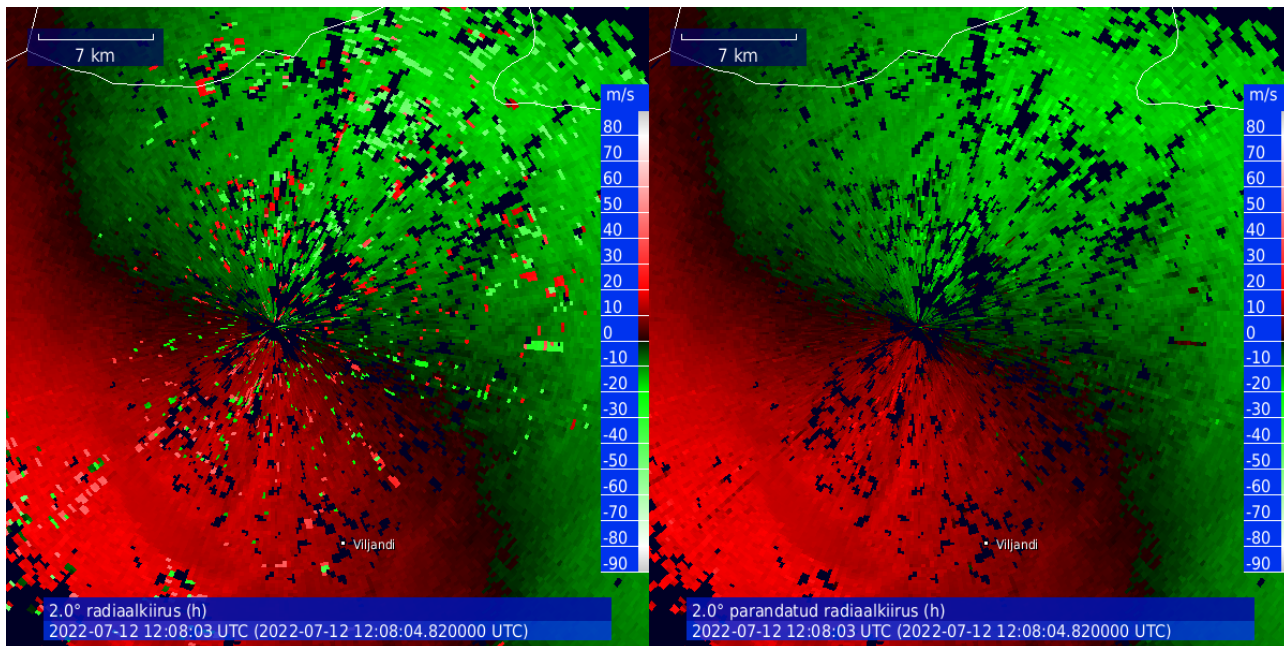
kus λ tähistab radari väljastatava raadiosignaali lainepikkust, T perioodi kahe radariimpulsi vahel. Kui võtta impulssidevaheliseks perioodiks 1/570 sekundit (vastab pulsikordussagedusele 570 Hz) ja lainepikkuseks 0,05 meetrit siis on maksimaalne mõõdetav tuule kiirus ainult 7,12 m/s. 10 cm lainealal töötav radar saaks aga mõõta kaks korda tugevamat tuult enne kui tekib radiaalkiiruse määramisviga (ingl k *aliasing*), mille tulemusena on mõõdetud tuule kiirus tegelikust $2v_{max}$ jagu nihkes. Ülaltoodud näites juhtuks nii, et tuulekiirus 8,24 m/s radarist eemale paistaks andmetes kui 6 m/s radari suunas. Pulsikordussagedust ei saa aga tõsta lõpmatuseni tingituna eelnevalt kirjeldatud radari põhimõttest – kajal on piiratud arv aega radarini tagasi jõuda enne kui juba järgmine impulss välja saadetakse. Seega tekib seos maksimaalse mõõdetava kauguse ja pulsikordussageduse vahel:

$$R_{max} = \frac{cT}{2} \quad (\text{American Meteorological Society, 2022b})$$

kus c tähistab valguse kiirust ja T perioodi kahe järjestikuse impulsi vahel. Eelmainitud perioodi 1/570 s puhul oleks maksimaalne mõõdetav kaugus umbes 262,976 km. Kui impulsside vaheline aeg jääb liiga lühikeseks, ei jõua enam radar eelmise impulsi kaja „ära oodata“ ning saadab välja uue impulsi. See tekitab aga segaduse kajade asukoha määramisel, sest radar oletab iga saabuva kaja puhul, et see tuli välja kõige viimasest impulsi. Seega, kõik kajad mis asuvad kaugemal kui piirkaugus, hakkavad paistma andmetes selle jagu radarile lähemal. Näiteks ülaltoodud näite puhul paistaks 263,976 km kaugusel olev kaja radarile kõigest 1 kilomeetri kaugusel olevat. Tekib dilemma: kõrgema pulsikordussagedusega skaneerides saame mõõta tugevamaid tuule kiiruseid, samas ei näe me selgelt kaugemale. Väikese pulsikordussagedusega saame „näha“ kaugemale, kuid mõnest meetrist sekundis tugevamate tuulte mõõtmine on raskendatud.

Wakimoto *et al.* olid sarnase probleemi ees VORTEX 95 vaatlusprogrammi käigus, kui oli oodata, et mõõdetakse tuule kiiruseid kuni 100 m/s ning ühe pulsikordussagedusega tehtud doppleri kiiruse mõõtmised on suurte vigadega. Selle mõju vähendamiseks kasutati mõõtmiste käigus ühe pulsikordussageduse asemel kahte pulsikordussagedust (edaspidi dual PRF), mille tulemusena saadi 3 cm laineala radarit kasutades laiendatud Nyquisti kiiruseks 78,7 m/s (Wakimoto, 1996). Samuti kasutasid Jorgensen *et al.* ühte dual PRF varianti lennukilt tehtud mõõtmistel (Jorgensen *et al.* 2000). Kuigi sellisel meetodil on võimalik laiendada radiaalkiiruste mõõtmisulatust, ei ole see siiski täiesti veakindel. Kui tuulteväli on ebaühtlane, võidakse andmepikslid klassifitseerida valesse

Nyquisti vahemikku ning andmetesse tekivad vigased pikslid (Jorgensen *et al.* 2000). Näide sellest, kuidas need vead andmetes välja näevad, on välja toodud joonisel 3.



Joonis 3: Radiaalkiirused enne ja pärast järeltöötlust. Vasakul pool on näha dual PRFile iseloomulikud määramisvead.

Selliste vigade parandamiseks on aja jooksul välja töötatud mitmeid algoritme, näiteks kohalikust mediaankiirusest lähtuv Hollemani ja Beekhuisi algoritm, mida kasutatakse selle töö käigus. Kõnealune algoritm säilitab ka andmete ruumilise lahutusvõime kuna ei toimu andmete „silumist“ (ingl k *smoothing*) (Holleman ja Beekhuis, 2003).

2. Andmed ja metoodika

2.1 Andmed

Töös kasutati Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrgu andmebaasi andmeid Eestis esinenud tornaadode ning nende tekitatud kahjustuste kohta ja Keskkonnaagentuuri Sürgavere ja Harku radarite andmeid.

Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrk on 2005. aastal asutatud vabatahtlike vaatlejate võrgustik. 2015. aastal laienes võrgustiku kogutud andmete liik ainult äikesevaatlustest ka teiste ohtlike ilmanähtusteni (Kiitsak, 2020). Võrgustiku andmeid on kasutatud ka varem teaduslikuks tööks, näiteks Kiitsaku bakalaureusetöös 2020. aastal. Võrgustikuga on seotud ka autor, pidades üleval andmebaasi tehnilist platvormi. Töö jaoks lähteandmete kogumise käigus tehti päring andmebaasi ning valiti sealt välja tornaadojuhtumid, mis leidsid aset aastatel 2019-2022. Ajavahemik on valitud selliselt, et keskenduda tornaadodele, mis leidsid aset pärast 2020. aasta maikuus tehtud konfiguratsioonimuudatust, kuid samas tuua näiteid ka aegadest mil radariandmete ajaline lahutusvõime oli halvem.

Keskkonnaagentuuri radarivõrgustikus on kaks radarit, üks Harjumaal Harku aeroloogiajaamas ning teine Viljandimaal Sürgaveres (Keskkonnaagentuur a). Radari andmed on IRIS RAW formaadis, neid on võimalik konverteerida ka ODIM HDF5 formaati. Käesoleva töö raames olid lähteandmeteks IRIS RAW formaadis failid, sest need sisaldasid radiaalkiiruste parandamiseks kasutatud programmimooduli jaoks vajalikku infot. Andmete struktuuris on aastate jooksul olnud mõningad muudatused. Kui enne 2020. aasta maikuud sisaldas üks andmefail tervet ruumiskaneeringut, siis pärast seda on iga skaneeritud kõrgusnurk eraldi failis. Lisaks lõpetati sama aasta kevadel toorandmetes radiaalkiiruste filtreerimine (isiklik kirjavahetus) vältimaks olukorda, kus võidakse tahtmatult välja filtreerida näiteks mesotsüklonid. Selline olukord on võimalik ning juhtus Tšehhis 24. juunil 2021 esinenud F4 tornaado ajal kui agressiivne filtreerimine maskeeris ära osa tornaadoga seotud mesotsüklonist ja takistas sünoptikutel olukorra tõsidusest täit pilti saamast (Púčík *et al.* 2022).

2.2 Metoodika

Töö käigus piirduakse valdavalt dual PRF režiimis kogutud andmete analüüsiga, kuna ühte pulsikordussagedust kasutava skaneeringu puhul on Nyquisti kiirus nõndavõrd madal, et sellest tingitud määramisvigade parandamine on äärmiselt tülikas.

Huvipakkuvate ajaperioodide identifitseerimiseks kasutati Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrgu andmebaasi ning Meteologix.com radaripiltide arhiivi, kus sisalduvad ka Eesti andmed alates 2019. aasta kevadest. Seejärel saadi juhendajalt toorandmed IRIS RAW formaadis leitud ajaperioodide kohta, millele teostati eeltöötlus. Eeltöötlus kasutas Pythoni skripti, mis tegi järgnevat:

1. Kontrollis, kas seda faili ei ole juba töödeldud (kas lõpp-produkt juba kettal eksisteerib).
2. Kui faili ei olnud varem töödeldud, siis avati see, kasutades Py-ART (Helmus ja Collis, 2016) moodulit.
3. Kontrollis kas etteantud andmefail sisaldab dual PRF andmeid. Kui mitte, jäeti fail kõrvale.
4. Juhul kui fail pärines aastast 2020 või hiljem, maskiti radiaalkiiruste andmevälja peegelduvusfaktori väljaga. Kõik andmeväärtused, millele vastavas asukohas oli peegelduvus alla -20 dBZ, filtreeriti välja.
5. Radiaalkiirustele rakendati parandusalgoritmi, kasutades moodulit `vcor_dual_prf` (Servei Meteorològic de Catalunya). Valitud meetodiks oli mediaanimeetod (Holleman ja Beekhuis, 2003), 13 x 13 km aknasuurusega. Parandatud radiaalkiirused salvestati eraldi andmevälja.
6. Andmed salvestati Py-ART moodulit kasutades uude faili, CfRadial formaadis.

Põhianalüüsi eel arendati andmete visualiseerimiseks kasutatavas tarkvarapakettis TRV esialgne tugi CfRadial formaadile, et selles formaadis andmeid oleks võimalik interaktiivselt kuvada. Samuti kohendati graafilist kasutajaliidest. Põhianalüüsi käigus analüüsiti visuaalselt peegelduvusfaktori, radiaalkiiruse, parandatud radiaalkiiruse ja ρ_{HV} väärtusi, otsimaks andmemustreid, mis võivad viidata kas tornaado keerise signatuuri ja/või tornaado prahi signatuuri esinemisele. Vajadusel päriti tarkvara kasutades üksikute pikslite väärtuseid. Sellest tulenevalt tehti kvalitatiivsed hinnangud järgmistele küsimustele:

1. Kas tornaado oli seotud mesotsükloniga?
2. Kas esines tornaadoprahisignatuur?

Hinnanguid võis olla kolm klassi:

- „jah“ – nähtusele viitav tüüpiline radarisignatuur oli andmetes näha.

- „ei“ – nähtusele viitavat tüüpilist radarisignatuuri ei olnud andmetes näha.
- „ebakindel“ – nähtusele viitavat tüüpilist radarisignatuuri võis andmetes leiduda, kuid selles puudub täielik kindlus, näiteks andmete kvaliteedi, signatuuri üksikasjade jm. tõttu.

Hindamise käigus koostati vajadusel kirjeldavaid jooniseid ning kirjutati üles tehtud tähelepanekud, mis on esitatud osas 3.

3. Tulemused

Andmete analüüsi tulemusena tehti järeldused, mis on esitatud tabelis 1. Lisaks loodi iga tornaadosündmuse kohta ka põhjalikumad hinnangud, kus selgitatakse, millel tabelis 1 esitatud tulemus põhineb. Täiendavalt loodi hinnang ühe potentsiaalse juhtumi kohta, mille kohta teateid Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrgus ei ole, kuid millest leidub potentsiaalselt märke radariandmetes.

Tabel 1. Radaripiltide analüüsi järeldused

Kuupäev	Mesotsüklon	Prahisignatuur
7. juuli 2019	Ei	Ei
6. august 2019	Ebakindel	Ei
11. august 2019	Jah	Ei
1. juuli 2020	Jah	Ei
21. juuli 2020	Ei	Ei
26. mai 2022	Jah	Ei
12. juuli 2022	Jah	Ebakindel

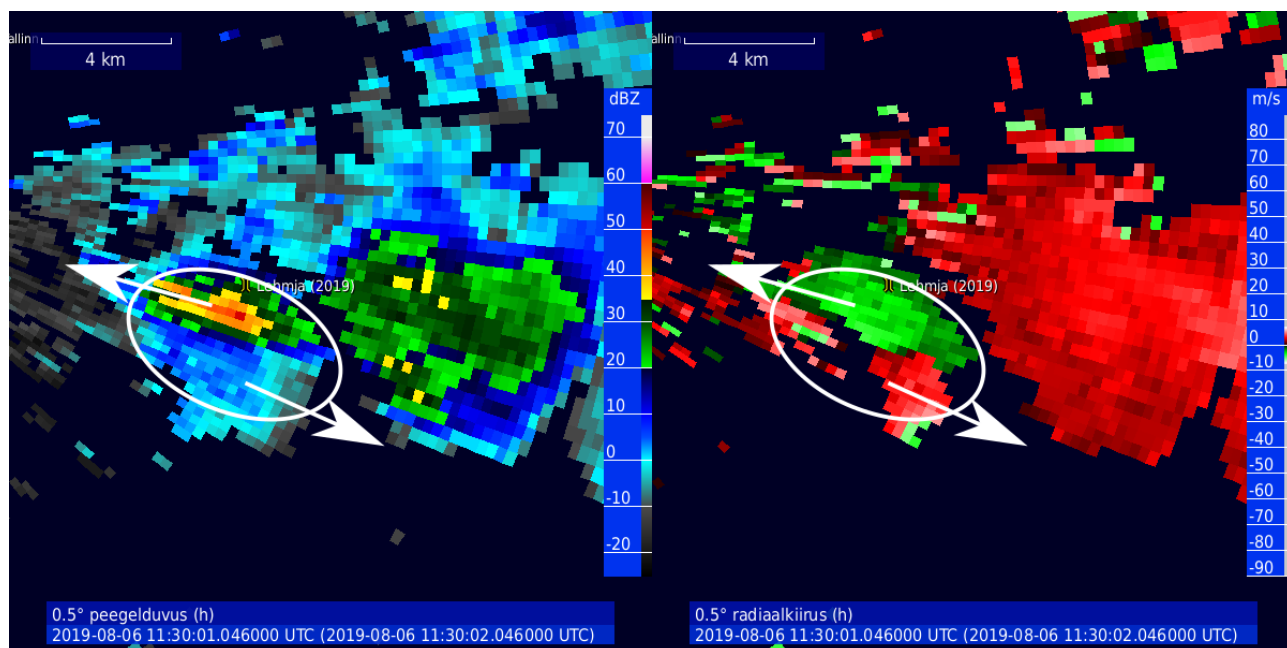
3.1 7. juuli 2019

Kell 12:50 UTC \pm 10 minutit täheldati tornaadot Valga maakonnas Helme alevikus. Piirkonnas oli pildistatud lehterpilvi ning see oli sisse kantud ka Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrgu andmebaasi. Märgitud asukohast põhjas oli kell 12:50 UTC alanud Sürgavere radari dual PRF skaneeringu andmetes näha hoogsajupilv peegelduvusega kuni 54,5 dBZ, kuid radiaalkiiruse andmetest pöörlemise signatuure ei leidunud. Tõenäoliselt võis olla tegu mittemesotsükloonaalse(te) tornaado(de)ga ehk kõnekeelselt öeldes maapüksi(de)ga. Kahjustuste kohta teated puuduvad (EÄTV andmebaas).

3.2 6. august 2019

Tornaado leidis aset kell 11:33-11:45 UTC \pm 5 minutit Harju maakonnas Lehmja külas. Ka sellel tornaadol oli pealtnägijaid ning see kajastub ka Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrgu andmebaasis. Kahjustuste kohta informatsioon puudub (EÄTV andmebaas). Paraku leidis see aset ajal, mil Harku radari töö oli häiritud ning kahe pulsikordussagedusega andmeid ei kogutud. Seejuures esines nähtus mainitud radarist vaid loetud kilomeetrite kaugusel. Sürgavere radar küll töötas ning ka selle andmetes oli kõnealuses piirkonnas nähtav hoogsajupilv, kuid selget pöörlemise andmemustrit ei esinenud. Selle juures tuleb aga arvestada kahte nüanssi: Esiteks – sellel ajal radiaalkiiruste andmeid veel filtreeriti, mistõttu esines tõenäosus, et mesotsüklonite signatuurid võisid filtritesse jääda. Teiseks on Sürgavere radari kaugus sündmuskohast sadakond kilomeetrit ning radarikiir on enam kui kilomeetri kõrgusel.

Kontrollides Harku ühe pulsikordussagedusega kogutud andmeid, leidis siiski mõningaid märke pöörlemisest mööndusega, et toonase seadistuse juures oli Nyquisti kiirus vaid 5,3 m/s. Kaadris oli märgatav andmemuster, mis võiks viidata nõrgale pöörlemisele ning mis ei olnud kiiruse määramisvigadest tingitud, kuid võttes arvesse, et Harku radar ei olnud tollel hetkel täielikult töökorras, on mesotsükloni olemasolu tulemustes märgitud ebakindlaks. Täheldatud muster on kujutatud joonisel 4.

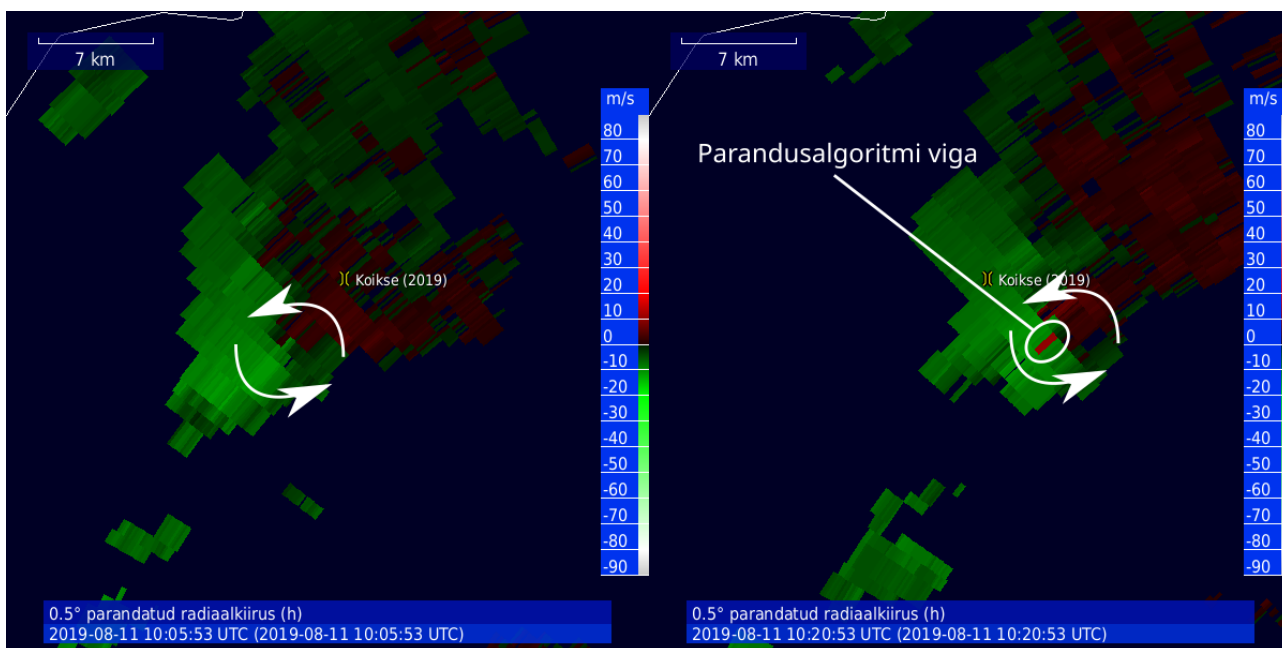


Joonis 4. Lehmja tornaado põhjustanud pilv Harku radarilt nähtuna peegelduvusfaktori ja radiaalkiiruse andmetes 6. augustil 2019 kell 11:30 UTC. Radiaalkiiruste värviskaalat on

võimendatud, et paremini välja tuua piiratud võimalike väärtuste vahemik. Punased värvid tähistavad radarist eemalduvaid kiirusi, rohelised radari poole suunatud kiirusi.

3.3 11. august 2019

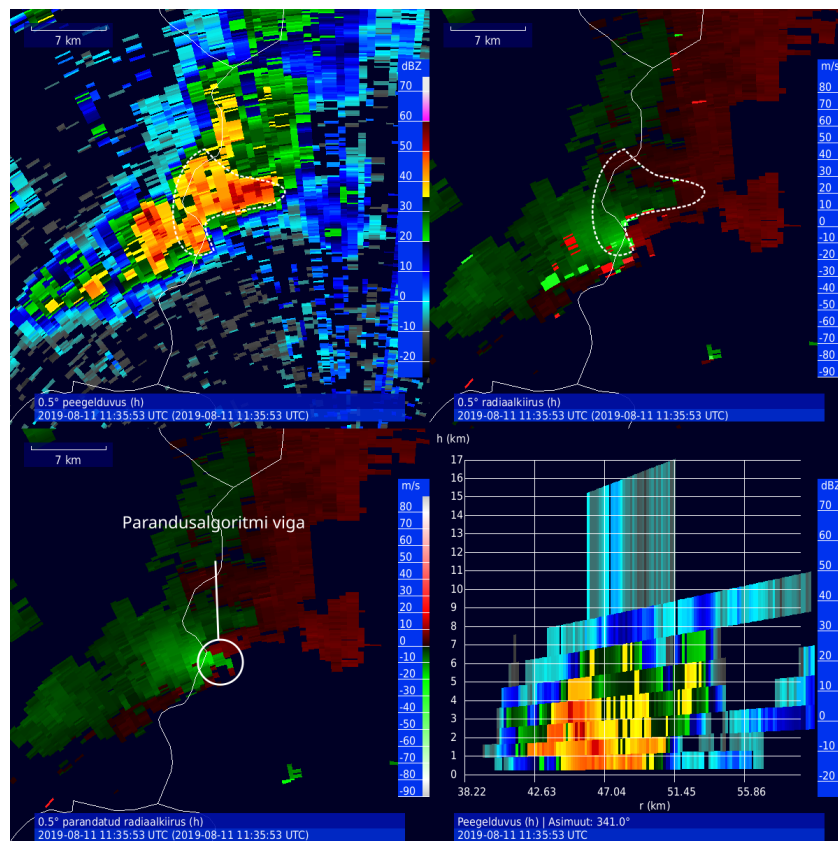
Kell 10:10-10:25 UTC \pm 5 minutit täheldati tornaadot Rapla maakonnas Koikse külas. Tegemist oli 2019. aasta kõige selgema kinnitatud tornaadoga seotud mesotsükloni signatuuriga, mis kestis radari madalast ajalisest lahutusvõimest hoolimata mitu radari andmetsükli. Pöörlemine muutus aimatavaks juba kell 9:50 UTC, muutudes iga järgmise andmekaadriga tugevamaks ning liikus pärast kella 10:05 UTC andmebaasi märgitud koordinaatidest lõuna poolt mööda. Kell 10:20 UTC alanud skaneeringu andmetes paistis pöörlemine välja veelgi selgemini. Oli nähtav selge kiiruskomponent radarist eemale ning selge komponent radari poole ka toretes andmetes, kuigi seal esines mõningaid määramisvigu. Joonisel 5 on kujutatud täheldatud tuulte paari koos kommentaaridega kell 10:05 ja 10:20 UTC tehtud skaneeringute andmetes.



Joonis 5: Korrigeeritud radiaalkiirused Sürgavere radari andmetes 11. augustil 2019 kell 10:05 UTC (vasakul) ja 10:20 UTC (paremal). 10:20 UTC pildis on näha üksikud pikslid, mida ei ole korrektsest parandatud, need on joonisel märgitud valge ovaaliga.

Kell 10:35 UTC oli tuulte paar veel radaril nähtav, kuid kella 10:50 UTC andmetes ei olnud see enam selgelt märgatav. Tornaado kohta on Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrku raporteeritud ka kahjustusi: kannatada saanud eterniitkatus ning mõned maha murtud puud (EÄTV andmebaas).

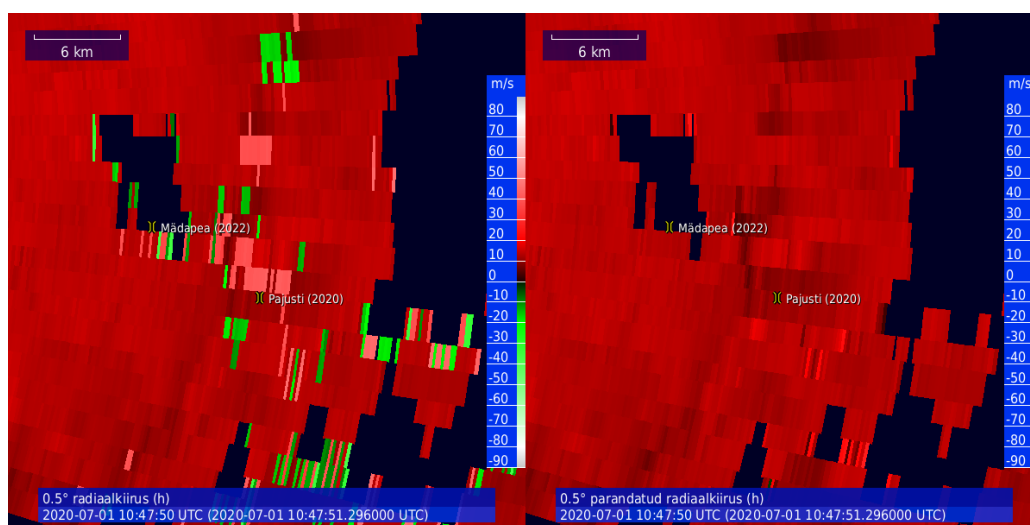
Ülalmainitud mesotsüklon ei jäänud sellel päeval ainsaks. Kella 11:05 UTC andmetes oli jälgitav uue mesotsükloni teke Lelle lähistel. Kuigi Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrku ei ole selle mesotsükloniga seoses tornaadoteateid tulnud (ainus raport sellest päevast on Koikse oma), olid esinenud andmemustrid piisavalt muljetavaldavad, et lisada see potentsiaalse juhtumina ka selle päeva ülevaatesse. Kella 11:20 UTC ja 11:35 UTC vahel mesotsüklon tugevnes järsult: Kui 11:20 UTC pildis ei olnud ta väga selgelt märgatav, siis kella 11:35 UTC radaripildis on tuulte paar selgelt näha. Seejuures paistab see originaalis paremini välja, kui parandatud versioonis. Peegelduvusfaktori andmetes on samal ajal jälgitav konksukaja. Samas ei ole näha olulist ρ_{HV} langust. Mesotsükloni kese on sellel ajal umbkaudu Iidva looduskaitseala piirkonnas ning radarikiir on poole kilomeetri kõrgusel. Joonisel 6 on näidatud kõnealune mesotsüklon oma haripunktis. Toodud on peegelduvusfaktor, radiaalkiirus ilma töötluseta, radiaalkiirus töötlusega ning ruumiskaneeringu eri kõrgusnurkade kaudu tekitatud vertikaalne läbilõige seonduvast äikesepilvest. On näha, et töötluse käigus ei ole radiaalkiiruste parandamine täiesti õnnestunud ning mesotsükloni juures on näha moonutusi. Pöörlemine jätkus tsükliliselt veel ligi kaks tundi kuni kella 13:50 UTC skaneeringuni, kadudes lõpuks radarilt Pedjast põhjas.



Joonis 6: Peegelduvusfaktor, toored radiaalkiirused, korrigeeritud radiaalkiirused ja pilve läbilõige Sürgavere radariandmete põhjal 11. augustil 2019 kell 11:35 UTC.

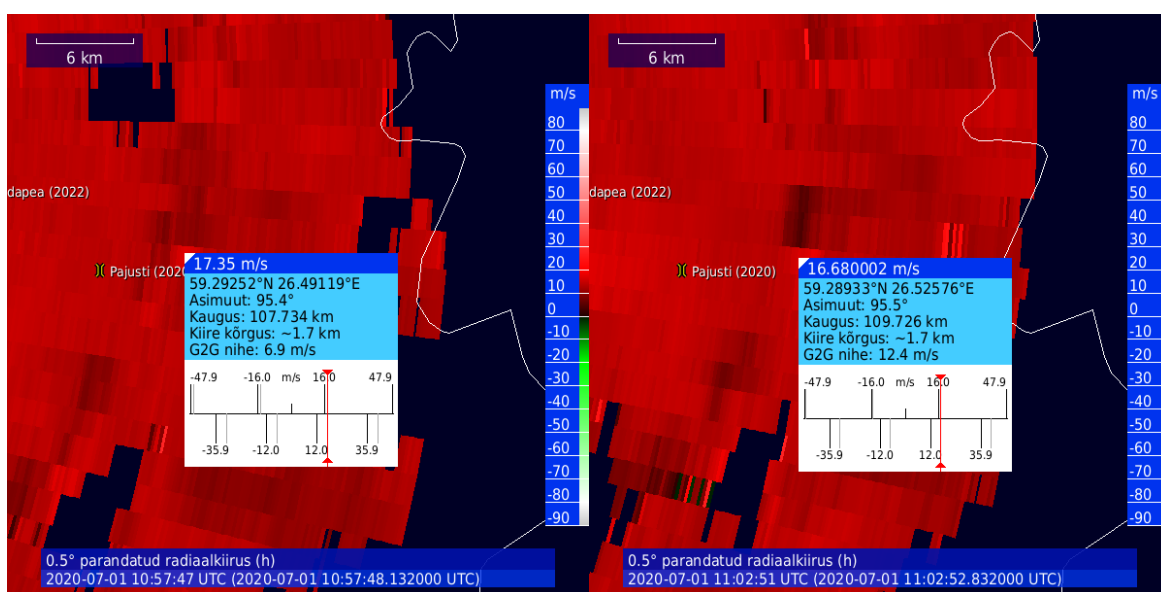
3.4 1. juuli 2020

Kell 10:55 UTC ± 15 minutit leidis aset tornaado Lääne-Viru maakonnas Pajusti alevikus. Tegemist oli esimese tornaadopäevaga pärast seda, kui Keskkonnaagentuur oli uuendanud oma radarikonfiguratsiooni, tänu millele oli võimalik nüüd saada andmeid 2,5-5 minutilise sammuga. Samas olid ka sellel suvel radaritega tehnilised probleemid. Konkreetsel päeval oli Sürgavere radar täiesti maas ning Harku andmed tulid katkendlikult. Sarnaselt 11. augustiga 2019 esines sellel päeval rohkem kui üks mesotsüklon ning oli näha, kuidas mesotsüklonid tekkisid ja kadusid tsükliliselt mööda konkreetset trajektoori liikudes. Märkid esimesest mesotsüklonist selle sündmuse kontekstis on märgatavad Harku radaril kella 9:17 UTC paiku, kui Kose lähedal hakkab moodustuma tuulte paar. Kella 9:32 UTC'ks on tuulte paar selgelt nähtav keskmega Harjumaal Uuearu lähedal. Kella 10:12 UTC'ks jõuab tuulte paar Tapa lähedale, mille järel tekib Harku radari töös taas katkestus. Kui kell 10:32 UTC Harku dual PRF andmed taastuvad, on eristatavad kaks nõrka tuulte paari – radiaalkiiruste erinevus kahes kõrvuti olevas asimuudiväravas (ingl k *ray*) olevate andmepunktide vahel on mõlemal juhul 7-9 m/s. Esimene neist tuulte paaridest asub Mädapea lähedal, teine Lasila lähedal. Kaugus Harku radarist on selleks hetkeks 93 kilomeetrit ning kiire kõrgus on umbes 1,4 km. Kõnealuse juhtumiga seonduv on Lasila lähedal olev tuulte paar. Kella 10:47 UTC paiku jõuab potentsiaalne pöörlemine Pajustisse. Sellel hetkel selget tuulte paari sisuliselt ei paista. Kuna maa peal siiski keerist nähakse, siis on tõenäoliselt see seletatav pöörlemise paiknemisega allpool radarikiirt. Piirkonna lähedal leidub aga spektrilaisi kuni 4,86 m/s ning lisaks sellele on dual PRF radiaalkiirustes märgata oluliselt määramisvigu. Võrdlus originaalsete ja parandatud radiaalkiirustega on toodud joonisel 7.



Joonis 7: Harku radarilt mõõdetud radiaalkiirused originaalkujul ja parandatud kujul 1. juulil 2020 kell 10:47 UTC.

Kella 10:52 UTC pildil on tuultepaar sisuliselt kadunud. Kella 10:57 UTC pildil hakkab ta uuesti nähtavale ilmuma. Kella 11:02 UTC pildil on see väga selgelt nähtav, ning maksimaalne radiaalkiiruste erinevus kahes kõrvuti olevas asimuudiväravas asuvate andmepunktide vahel tõuseb üle 10 meetri sekundis. Samuti on tõusnud peegelduvusfaktor, olles nüüd kuni 50,35 dBZ. ρ_{HV} on endiselt üle 0,9. Selleks hetkeks on mesotsükloni kese Kantkülas, mis asub radarist nõnda kaugel, et radariikiir on ligikaudu 1,7 km kõrgusel. Kella 11:07 UTC radaripildil on see veel tajutav, kuid nõrgeneb jätkuvalt ning kella 11:12 UTC paiku väljub dual PRF andmete levialast. Joonisel 8 on kujutatud mesotsükloniga seotud tuultepaari võrdlust kella 10:57 UTC ja 11:02 UTC vahel.



Joonis 8: Radiaalkiiruste võrdlus 1. juulil 2020 kella 10:57 ja 11:02 UTC vahel. 10:57 UTC pildil valitud pikslil oli radiaalkiirus 17,35 m/s radarist eemale, radiaalkiiruse erinevuse absoluutväärtus kõrvalasimuudil olnud piksliga võrreldes oli 6,9 m/s. 11:02 UTC pildil valitud pikslil oli radiaalkiirus 16,68 m/s radarist eemale ja erinevuse absoluutväärtus kõrvalasimuudil olnud piksliga võrreldes 12,4 m/s. Kiire kõrgus oli ligikaudu 1,7 km.

Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrgu andmebaasi andmetel esines selle tornaadoga ka kahjustusi. Kannatada said majade katused ning samuti langes hulk puid. Tornaado intensiivsus TORRO tornaadotugevuse skaalal oli tasemel T1 (EÄTV andmebaas).

3.5 21. juuli 2020

Tornaado esines kell 8:44 UTC \pm 15 minutit Pärnu maakonnas Ertsma külas. Ka selle tornaado puhul eksisteerib videomaterjali nii, et on teada, et nähtus leidis aset. Antud juhul oli tõenäoliselt

tegemist mittemesotsükloonaalse tornaadoga, sest mesotsüklonit radariandmetes ei leidunud. Registreeritud tornaado ajal oli piirkonnas sajuala, kuid radiaalkiiruste osas midagi märkimisväärset silma ei hakanud. Ka dual PRF radiaalkiiruse määramisvead pilve siseosades puudusid. See on oluline erinevus võrreldes selle töö raames analüüsitud tornaadojuhtumitega, kus tuvastati ka mesotsükloni esinemine. Kahjustuste kohta info puudub.

3.6 26. mai 2022

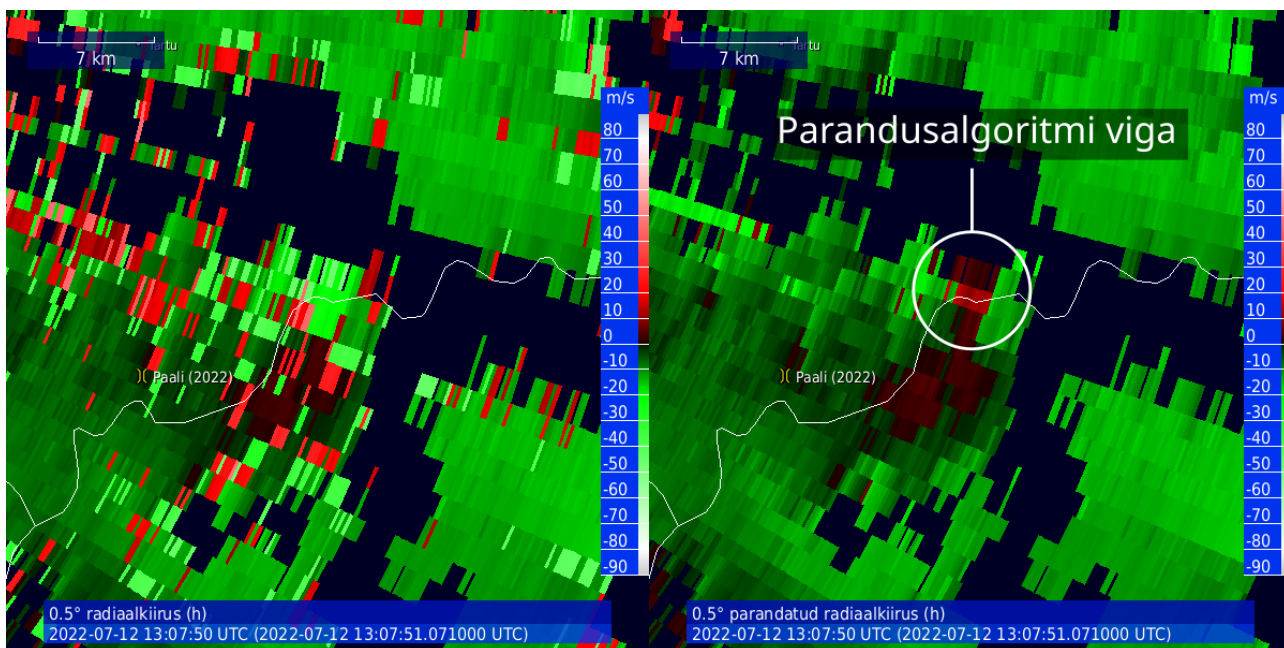
Kell 15:00 UTC \pm 15 minutit esines tornaado Lääne-Viru maakonnas Mädaepe külas. Sündmuspaik asub nii Sürgavere kui ka Harku radari levialas. Mõlemad radarid ka töötasid sellel õhtul. Kell 14:42-14:47 UTC on võimalik näha Mädaepe vahetus läheduses tuultepaari nii Harku, kui ka Sürgavere radari andmetes. Harku radaril on see paremini nähtav kell 14:42 UTC, Sürgavere radaril kell 14:47 UTC. Paradoksaasel kombel paistab tuultepaar välja selgemalt just Sürgavere andmetes, kuigi see asub sündmuspaigast kaugemal ja kiir seega kõrgemal. Samas oli mõlemal puhul tegemist võrdlemisi nõrga signatuuriga ning selle tuvastamine eriti Harku andmetes nõudis väga põhjalikku uurimist. Ilma Sürgavere andmeteta oleks autor selle juhtumi puhul mesotsükloni esinemise klassifitseerinud ebakindlaks. Täiendava tuvastust potentsiaalselt takistava faktorina oli sündmuspaiga kaugus Harku radarist 95 km ja Sürgavere radarist 104 km, mistõttu olid mõlema radari kiired enam kui kilomeetri kõrgusel. Tornaado tekitas ka kahjustusi, suuri kahjustusi sai MTÜ Ralliradale kuulunud puhkemajake (EÄTV andmebaas).

3.7 12. juuli 2022

Kell 13:30 \pm 5 minutit leidis aset tornaado Tartu maakonnas Paali külas, mis põhjustas suuri kahjustusi. Mitmed hooned said kannatada, üks maja oli peaaegu täielikult hävinenud. Samuti oli murtud või juurtega maast välja rebitud suuremaid ja keskmise suurusega puid. TORRO tornaadotugevuse skaalal klassifitseerus tornaado tasemel T3 (EÄTV andmebaas). Külas viibis mõned nädalad pärast tornaadot ka autor ning ka siis oli veel näha jälgi kahjustustest.

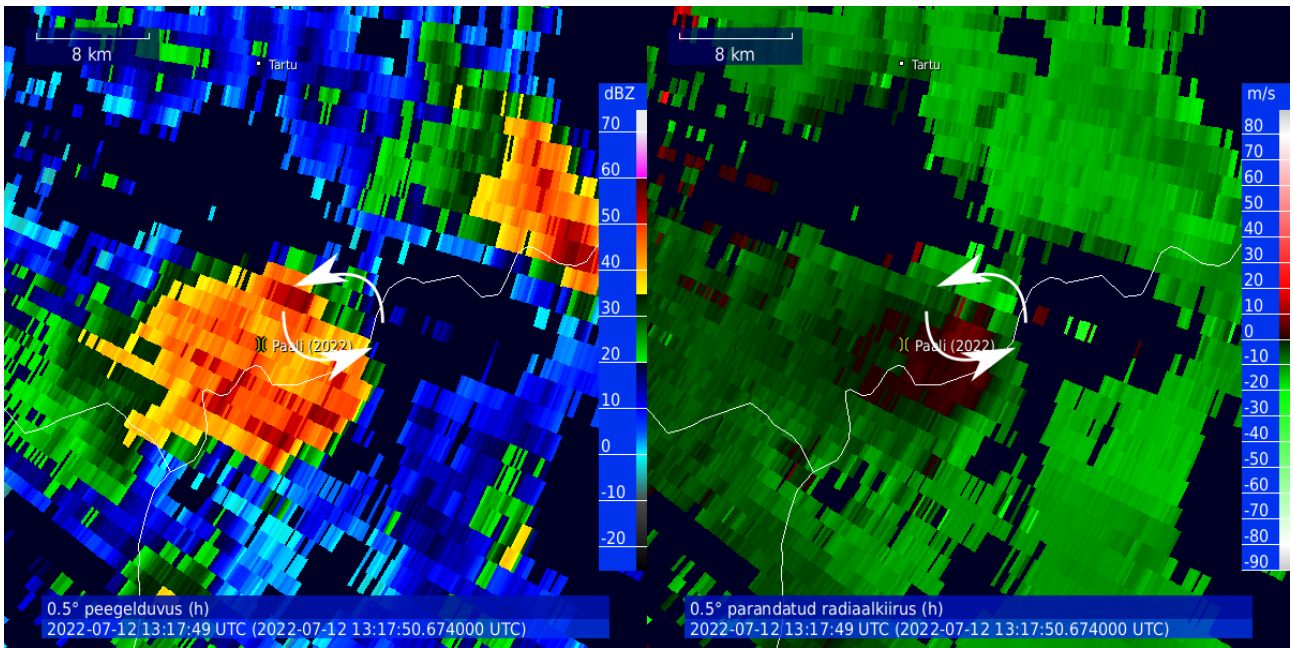
Kõnealusel päeval leidis mesotsüklooneid aset korduvalt. Paali tornaado põhjustanud äikesepilved ilmusid Sürgavere dual PRF andmete levialasse kella 12 UTC ajal. Edasine analüüs ongi tehtud just Sürgavere andmeid kasutades. Radiaalkiirustes esines sellel pärastlõunal määramisvigu sellisel määral, et nende parandamine osutus keeruliseks ning kasutatud algoritm hakkas sellega hätta

jääma. Seetõttu tuli kasutada sarnast lähenemist 11. augusti 2019 andmetega ning automaatse parandamise asemel otsida vigadest puutumata jäänud andmepunkte ning hinnata neid. Kella 12:52 UTC paiku hakkas selgemalt ilmne, et Võnnust lõunas võib olla mesotsüklon mis liigub Uniküla poole. Radarile lähenedes hakkas ka tuulte paar selgemini paistma. Kell 13:07 UTC oli võimalik juba ka tooreid radiaalkiirusi vaadates hinnata, et tegemist võib olla mesotsükloniga. Näide tooretest ja parandatud andmetest sellel ajamomendil on esitatud joonisel 9.



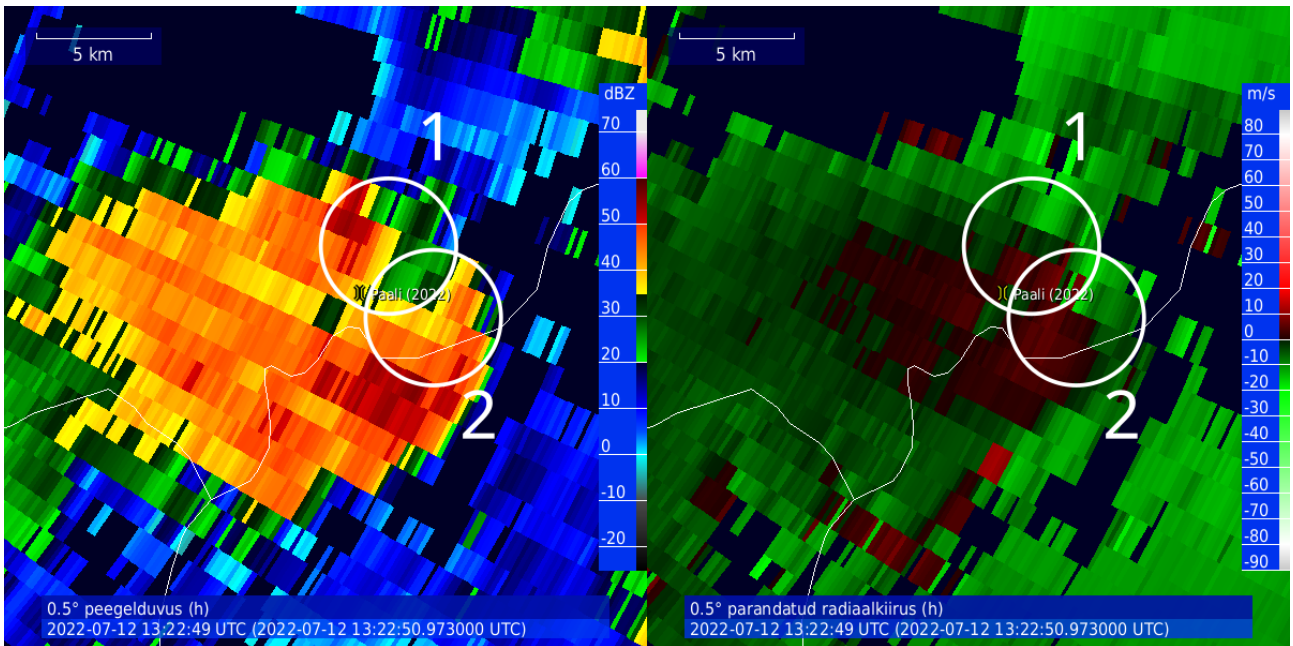
Joonis 9: Töötlemata (vasakul) ja töödeldud (paremal) radiaalkiirused 12. juulil 2022 kell 13:07 UTC.

Joonisel on taas näha olukord, kus originaalandmetes on mürast hoolimata tuulte paar märgatav, kuid paranduse algoritm peab osa sellest vigasteks andmeteks (vrd. joonis 6). Kell 13:17 UTC on pöörlemise kese Sirvaku kohal. Siin on täheldatav sarnane olukord Joonisel 6 kujutatava olukorraga kus pool pöörlemistsoonist jääb tugevamate (50-55 dBZ) kajadega ning pool nõrgemate (kuni 30 dBZ) kajadega alasse. Vahetust pöörlemistsoonist eemal leidub ka lõike veelgi tugevamate kajadega. Võrdlus peegelduvuse ja radiaalkiiruste vahel kella 13:17 UTC skaneeringu andmetes on esitatud joonisel 10. Tähistatud on ka potentsiaalne pöörlemine.



Joonis 10: Peegelduvus ja radiaalkiirus 12 juulil 2022 kell 13:17 UTC. Märgitud on pöörlemise kese.

Kell 13:22 UTC on näha äikesepilve jagunemine kaheks ning kahe eraldi pöörlemise moodustumine. Joonisel 11 on välja toodud peegelduvuse ja radiaalkiiruste võrdlus seisuga kell 13:22 UTC, kus on märkitud kaks pilveosa. Vana pöörlemine on tähistatud numbriga 1, uus pöörlemine numbriga 2.



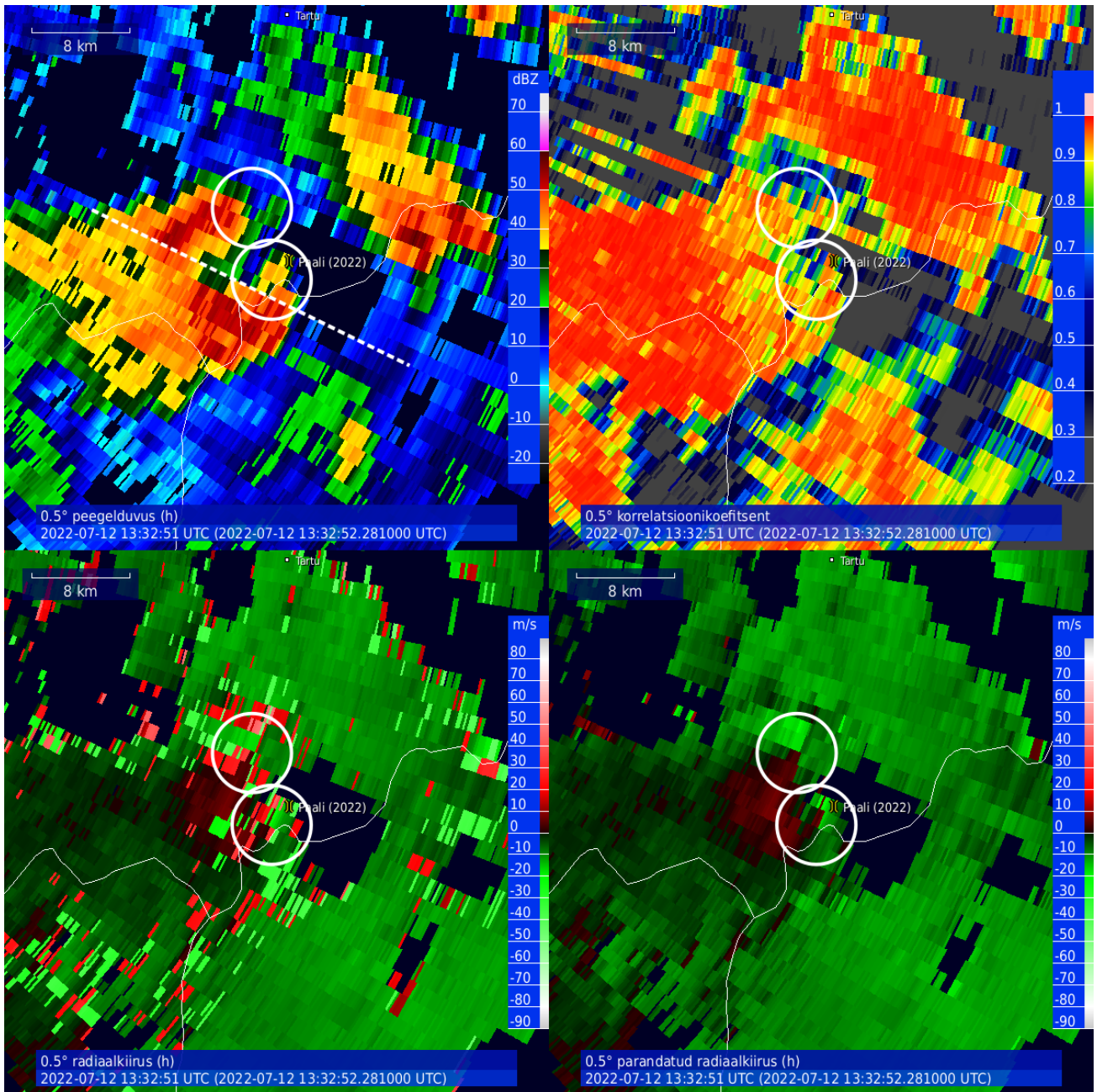
Joonis 11: Peegelduvus ja radiaalkiirus 12. juulil 2022 kell 13:22 UTC.

Kella 13:30 UTC paiku jõuab pöörlemine number 2 Paali külla. Kella 13:32 UTC dual PRF skaneeringus, mille visualiseering on esitatud joonisel 12, hakkavad silma mitu asja. Esiteks on peegelduvuses moodustunud omamoodi konksukaja, mis on näiteks joonisel 2 kujutatud „konksuga“ võrreldes 180 kraadi ümber pööratud. Teiseks ei kehti enam joonisel 10 tehtud tähelepanek kus pool pöörlemistsooni on tugevatest kajadest väljas. Seekord on enam kui 35 dBZ tugevusega peegelduvusi näha nii radarist eemalduvate, kui ka radarite poole liikuvate tuultega aladel. Tuultepaarid eksisteerivad endiselt mõlemad, kuigi parandamise algoritmil on raskusi selle korrektse kujutamise. Märkimist väärib aga ρ_{HV} dual PRF skaneeringu andmetes. Nimelt leidub pöörlemise keskme lähedal pikslid, kus ρ_{HV} on ainult kuni 0,61 samal ajal kui peegelduvus on 41,9 dBZ.

Sellest tingitult tõstatub küsimus, kas siin võis esineda tornaadoprahisignatuur. Võiks arvata, et rahuldamata jääks peegelduvuskriteerium, sest peegelduvusfaktor on alla 45 dBZ. Samas võivad kajakad selles punktis olla nõrgendatud tingituna umbes 8 km radari poole asuvast sajupilvest, milles esines kajasid tugevusega kuni 55,4 dBZ ning mis oli seotud pöörlemisega number 1. Seetõttu ei ole välistatud, et peegelduvus analüüsitud punktis oli signaali sumbumise tõttu nõrgem, kui olukorras, kus seda pilve ei oleks ees olnud. Illustreerimaks vihmast tingitud signaali sumbumise tsooni piiri on joonisele 12 tõmmatud katkendjoon. Ka siin on näha, et pöörlemisega 2 seotud pilves on märgatav peegelduvuse gradient just mööda seda mõttelist piirjoont.

Tornaadoprahisignatuuri kasuks räägib ka, et andmetest joonistub välja konksukaja, kuigi ümberpööratud kujul ning see, et vähenenud ρ_{HV} väärtusega pikslid asusid just seal kus olid potentsiaalselt tugevaimad tuule kiiruse väärtused radari suunas liikuvale pöörlemise komponendil – seega pöörlemise keskme lähedal. Samas tekitab ebakindlust 24 sekundit varem samal kõrgusnurgal toimunud ühte pulsikordussagedust kasutanud skaneering, kus oli küll samuti vaadeldav ρ_{HV} vähenemine, kuid väärtused olid vahemikus 0,83...0,85. Kuigi võib kaaluda ka varianti, et ρ_{HV} langus leidis aset pärast selle piirkonna ühe pulsikordussagedusega skaneerimist, on see siiski autori jaoks piisav määramatus, et klassifitseerida tornaadoprahisignatuur kui „ebakindel“, samas seda mitte täielikult välistades.

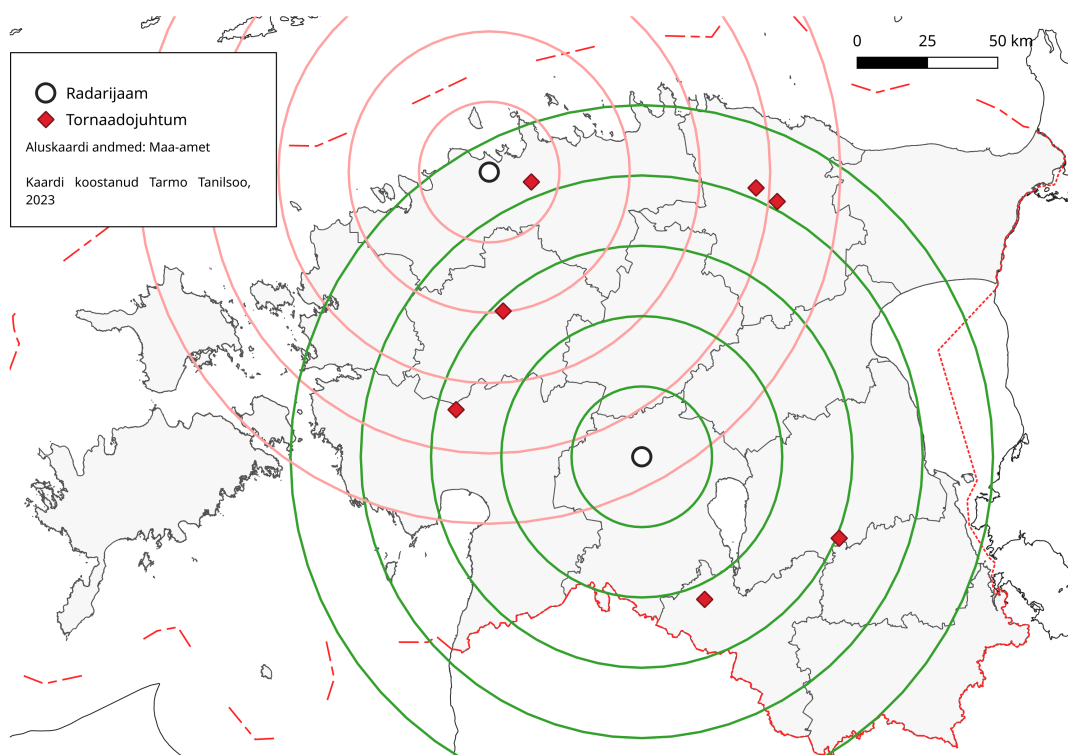
13:37 UTC kaadri pöörlemine enam nii selge ei ole, kuid tugevneb 13:47 UTC paiku uuesti. Mesotsüklon jääb radaril jälgitavaks mitmeks tunniks, hääbudes alles Viljandimaal pärast kella 15:42 UTC, kusjuures samas regioonis kujunes peagi välja uus pöörlemine.



Joonis 12: Peegelduvuse, ρ_{HV} ja radiaalkiiruste võrdlus 12. juulil 2022 kell 13:32 UTC, võimaliku sumbuvuse tsooni piir on tähistatud peegelduvuse pildil katkendjoonega.

4. Arutelu

Valitud 7 juhtumist neljal leitud radariandmetes kindlaid signatuure, mille alusel võis kahtlustada mesotsükloni esinemist. Üks juhtum jäi poolikute andmete tõttu ebaselgeks. Ühel juhul oli potentsiaalne tornaadoprahisignatuuri juhtum, kuid selle osas jäi autor samuti ebalevaks, samas seda täielikult mitte välistades. Tornado poolt üles tõstetud prahi sagedane mitte tuvastamine võib olla tingitud uuritud juhtumite kaugusest radaritest ning esinenud tornaadode intensiivsusest. Valitud juhtumitest ainuke, mis asus radarile lähemal kui 25 kilomeetrit, oli 6. augusti 2019 juhtum, mille ajal oli kahjuks Harku radar tehniliste probleemidega. Enamikel juhtudel oli tornado kaugus radarist üle 50 kilomeetri. Selles osas on eriti halvas seisus Kirde-Eesti juhtumid, mis olid ühtmoodi kaugel nii Sürgaverest kui ka Harkust. Sama probleem on Kagu-Eestis, kus radarikiired on kõrgemal kui 1 kilomeeter ning seetõttu on seal pöörlemine tuvastatav ainult siis, kui see levib ka kõrgematesse õhukihtidesse. Radarite asetust uuritud tornaadode suhtes iseloomustab joonis 13. Joonisel on kujutatud radarite asetus Eestis koos raadiuseringidega 25 kilomeetrise sammuga. Leviala on kujutatud ainult 125 km raadiuses, sest nii kaugemale ulatuvad tavaliselt dual PRF andmed tingitult kasutatavatest pulsikordussagedustest.



Joonis 13: Analüüsitud tornaadojuhtumite asukohad Sürgavere ja Harku radarite suhtes koos samakaugusjoontega radaritest 25 km sammuga. (Taustkaardi andmed: Maa-amet)

Analüüsimisel osutus raskuseks ka dual PRF skaneeringule omased radiaalkiiruste määramisvead ning nende parandamiseks kasutatava algoritmi omapärad. Korduvalt tuli ette, et mesotsüklon paistis parandusalgoritmile veana, mistõttu sai osa mesotsükloni tuultest vastassuunalise komponendi, mida tegelikult ei eksisteerinud. Seetõttu tuli aeg-ajalt võtta kõrvale ka toored radiaalkiiruste andmed ning visuaalselt hinnata määramisvigadest puutumata jäänud andmepunktide põhjal, kummad andmed on antud punktis õigemad. Samas ei olnud määramisvead nii rasked kui need oleksid olnud ühte pulsikordussagedust kasutades. Võttes arvesse, et Eesti radarid kasutavad C-laineala, lainepikkusega 5 cm, leiab juba nt. 25 m/s kiiruste puhul aset mitmekordne määramisviga, mistõttu on oht parandamisalgoritmiga hinnata vastus valesse Nyquisti intervalli, eriti kui kiiruste osas eksisteerib väga äkiline gradient. Autori hinnangul tuli seda ette ka dual PRF andmete puhul. Sellest tulenevalt näeb autor potentsiaalseid uurimisküsimusi tulevikuks Eesti oludele keskendudes:

- Kuidas tulevad erinevad dual PRF andmete radiaalkiiruste parandamise algoritmid toime mesotsüklonite kujutamiseks?
- Millised on kõige optimaalsemad seadistused juba olemasolevate algoritmide jaoks mesotsüklonite vaatenurgast?
- Kuidas kõige paremini teha radiaalkiiruste parandamist dual PRF radariandmetele, mis sisaldavad mesotsüklonite signatuure? Kas arendada uus algoritm või leida algoritm mujalt maailmast, mis keskendub just mesotsüklonitele jt. kohalikele konvektiivsetele nähtustele, kus võivad eksisteerida järsud tuule kiiruse ja -suuna gradiendid?

Kokkuvõte

Töö eesmärk oli kvalitatiivselt analüüsida aastatel 2019 kuni 2022 Eestis aset leidnud tornaadode ajal kogutud meteoradari andmeid ning tuvastada, kas nende tornaadodega kaasnes mesotsüklon ning kas tornaado tõstis üles prahti sellisel määral, et seda oleks olnud võimalik radariga vaadelda. Töö oodatavaks väljundiks oli kinnitada rahvusvahelises kirjanduses ilmunud teooriate kehtivust ka Eesti tingimustes ning näidetekogu loomine, mida võiks kasutada ka tulevikus operatiivselt äikesehoiatuste väljastamisel, kogudes kokku faktorid, mille osas tasub tähelepanelik olla.

Töö käigus kasutati kahte peamist andmeallikat: Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrgu andmebaas ning Keskkonnaagentuuri radariandmed. Andmebaasi ning avaliku radaripiltide arhiivi alusel identifitseeriti huvipakkuvad ajaperioodid. Radariandmetest kasutati üldjuhul ainult neid andmeid, mis olid kogutud dual PRF režiimis. Ainult ühel juhul kasutati dual PRF andmete puudumise tõttu läbivalt ühe pulsikordussagedusega kogutud andmeid. Radariandmefailidele teostati eeltöötlus, kus parandati mediaanide meetodit kasutades radiaalkiiruse andmetes esinenud määramisvead. Seejärel visualiseeriti tulemused autori kirjutatud tarkvarapaketi TRV. Analüüsi käigus koostati illustreerivaid jooniseid, kus juhiti tähelepanu erinevatele aspektidele andmetes.

Analüüsi tulemusena tuvastati kindlalt mesotsükloni esinemine neljal juhul seitsmest uuritud juhtumist. Oli ka üks juhtum, kus jäädi ebakindlaks seoses radari tehnilisest seisukorrast tingitud piirangutega andmete saadavuse osas. Lisaks sellele tuvastati täiendavaid mesotsükcloneid, millega seonduvalt Eesti Äikese- ja Tormivaatlejate Võrgu andmebaasis tornaadoteateid ei ole. Tuvastati ka üks potentsiaalne tornaadoprahisignatuuri juhtum, kuid autor jäi selle osas ebakindlaks. Tornaado prahti vähene tuvastatavus oli tõenäoliselt tingitud enamiku uuritud juhtumite kaugusest radaritest ning tornaadode tugevustasemest. Ainult üks juhtum oli radari vahetus läheduses, kuid kahjuks ajal, mil sellel radaril olid tehnilised probleemid.

Analüüsi käigus puututi korduvalt kokku olukorraga, kus veaparandusalgorithm kippus mesotsüklonitega seotud tuulekomponente veaks arvestama. Sellest tulenevalt oli vajalik kõrvutada parandatud andmeid originaalandmetega, et teha nende põhjal järeldus selles osas, millised andmepunktid millistes andmetes õiged on. Identifitseeriti ka täiendavad potentsiaalsed

uurimissuunad, just Eesti keskkonda (teine radari sagedus võrreldes USA NEXRAD võrgustikuga jt, tüüpiline tornaadode intensiivsus jne) arvesse võttes.

Development and lifecycle of tornadoes in Estonia based on radar data

Tarmo Tanilsoo

Summary

The purpose of the thesis is to carry out a qualitative analysis of C-band radar images taken by the observation network of Estonian Environmental Agency during tornado events in Estonia which occurred between the years of 2019 and 2022 and identify cases where tornadoes were accompanied by a mesocyclone. Additionally there was an attempt to identify cases where a tornadic debris signature (TDS) could be observed. There were two expected outputs to the thesis: confirmation whether theories about tornadic radar signatures published abroad could also be applied in the Estonian context, as well as creation of a compilation from a set of examples, that could potentially be used as a reference in local operational nowcasting and issuance of thunderstorm warnings.

Two main sources were used for this thesis: The database of the Estonian Thunderstorm Observers Network (ETON) and radar data from the Estonian Environmental Agency. Time periods of interest were identified using the database from the said network as well as images from a publicly available radar image archive. Out of radar data, the work concentrated on observations carried out with two pulse repetition frequencies (PRF) due to very low Nyquist velocities for single PRF observations owing to the frequency band used by weather radars in Estonia. Single PRF observations were primarily used for one case as a result of no dual PRF data being available due to technical issues. Radar data was received in IRIS RAW format, processed using Py-ART and `vcor_dual_prf` Python module in order to remove aliasing errors characteristic to dual PRF data. The correction was carried out using the median method with a 13×13 km window. The corrected data was stored as a separate moment and processed data files were saved in a Cfradial formatted file with Py-ART. To facilitate visualising the said data, an elementary Cfradial support and modifications to the graphical user interface were developed to the software package TRV developed by the author, which was then heavily used to visualise data in various radar moments and variables.

During the analysis, the radar data was reviewed by the author looking for typical signs of either a tornado vortex signature (TVS) or a tornadic debris signature (TDS). For this purpose various radar

moments and variables, such as reflectivity, radial velocity and polarimetric correlation coefficient ρ_{HV} were used with individual data bins interrogated for values using the software TRV as deemed necessary. Observations made during the analysis were illustrated using multiple figures based on the output from TRV's plotting facilities, and a textual summary was written for each of the tornado cases. A determination whether a TVS and/or a TDS occurred, was made as a rating with three possible values: 'Yes', if there was a clear signature to the author's satisfaction. 'No', if there was no signature visible, and 'Unsure' where there was insufficient confidence for a 'Yes' rating, but where an existence of a signature could not be completely ruled out either.

In total, 7 tornado cases were analysed: 7 July 2019, 6 August 2019, 11 August 2019, 1 July 2020, 21 July 2020, 6 May 2022 and 12 July 2022. Four cases, 11 August 2019, 1 July 2020, 6 May 2022 and 12 July 2022 were identified to have contained a TVS. During the analysis of 11 August 2019 event, an additional mesocyclone was identified in the data after the main event. Even though there were no tornado reports associated with the latter mesocyclone in the ETON database, the radar signatures were impressive enough to merit a mention in the analysis. Additionally, a possible rotation signature was identified in the 6 August 2019 case, but this was rated 'Unsure' owing to the technical issues with the radar concerned at the time. There was one suspected case of a TDS, on 12 July 2022 where ρ_{HV} values as low as 0.61 were observed in a part of a couplet accompanied by radar reflectivity up to 41.9 dBZ in a dual PRF scan during a tornado that hit the village of Paali in Tartu county. It is believed that the reflectivity in the suspected TDS was so low as a result of rain fade, as there was an area of reflectivity up to 55.4 dBZ about 8 km closer to the radar along the same ray. However, in the preceding single PRF scan, which took place 24 seconds earlier at the same elevation angle, ρ_{HV} values were only 0.83-0.85. As a result of these uncertainties, the presence of a TDS was rated as 'Unsure' while not completely ruled out. It is suspected that the nearly non-existent amount of TDS detections in the analysed cases was due to distance from the radar as well as intensity of a particular tornado. Only one tornado occurred within 25 km of a radar site, but at a time when the given radar was having technical difficulties.

During the analysis, cases occurred where the dealiasing algorithm discounted data bins that were a part of a mesocyclone as aliasing even though they were likely actual values. As such, it was occasionally necessary to visually compare the unprocessed radial velocities against processed radial velocities to identify which data bins are correct in which dataset. Additional areas of

potential research were identified in the context of Estonian environment (different radar frequency compared to NEXRAD, typical intensity of tornadoes etc).

Tänuavaldused

Tänuõnad lähevad minu juhendajatele Tanel Voormansikule ja Jaak Jaagusele minu juhendamisele kulutatud aja, allikate otsimisel abistamise, julgustamise ning antud nõu ja soovitude eest. Samuti soovin tänada Sven-Erik Ennot täiendava tagasiside, keelelise nõu ning näpunäidete eest töö viimistlemise käigus.

Kirjanduse loetelu

- American Meteorological Society, 2022a. Landspout. Glossary of Meteorology. <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Landspout> (vaadatud 24.05.2023)
- American Meteorological Society, 2022b. Maximum unambiguous range. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Maximum_unambiguous_range (vaadatud 24.10.2022)
- American Meteorological Society, 2022c. Maximum unambiguous velocity. Glossary of Meteorology. https://glossary.ametsoc.org/wiki/Maximum_unambiguous_velocity (vaadatud 24.10.2022)
- American Meteorological Society, 2022d. Mesocyclone. Glossary of Meteorology, <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Mesocyclone> (vaadatud 22.05.2023)
- American Meteorological Society, 2022e. Tornado. Glossary of Meteorology, <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Tornado> (vaadatud 20.05.2023)
- Antonescu, B., Schultz, D. M., Holzer, A., Groenemeijer, P., 2017. Tornadoes in Europe: An Underestimated Threat. Bulletin of the American Meteorological Society, Volume 98, Issue 4: 713-728. DOI: 10.1175/BAMS-D-16-0171.1
- Brown, R. A., Lemon, L. R., Burgess, D. W., 1978. Tornado Detection by Pulsed Doppler Radar. Monthly Weather Review, Volume 106, Issue 1: 29-38. DOI: 10.1175/1520-0493(1978)106<0029:TDBPDR>2.0.CO;2
- Burgess, D. W., Lemon, L. R., Brown, R. A., 1975. Tornado characteristics revealed by Doppler radar. Geophysical Research Letters, Volume 2, Issue 5: 183-184. DOI: 10.1029/GL002i005p00183
- Eesti Keele Instituut, 2022a. EKI ühendsõnastik, tornaado. <https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/tornaado/1> (vaadatud 18.03.2023)
- Eesti Keele Instituut, 2022b. Meteoroloogia ja klimatoloogia terminibaas, tromb. <https://sonaveeb.ee/search/unif/dlall/dsall/tromb/2> (vaadatud 18.03.2023)
- Fujita T., 1958. Mesoanalysis of the Illinois Tornadoes of 9 April 1953. Journal of Atmospheric Sciences. Volume 15, Issue 3: 288-296. DOI: 10.1175/1520-0469(1958)015<0288:MOTITO>2.0.CO;2
- Helmus, J.J., Collis, S. M., 2016. The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a Library for Working with Weather Radar Data in the Python Programming Language. Journal of Open Research Software. Volume 4, Issue 1: e25. DOI: 10.5334/jors.119

- Hengstebeck, T., Wapler, K., Heizenreder, D., Joe, P., Radar Network–Based Detection of Mesocyclones at the German Weather Service. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Volume 35, Issue 2: 299-321. DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0230.1
- Holleman, I., Beekhuis, H., 2003. Analysis and Correction of Dual PRF Velocity Data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Volume 20, Issue 4: 443-453. DOI: 10.1175/1520-0426 (2003)20<443:AACODP>2.0.CO;2
- Jorgensen, D. P., Shepherd, T. R., Goldstein, A.S, 2000. A Dual-Pulse Repetition Frequency Scheme for Mitigating Velocity Ambiguities of the NOAA P-3 Airborne Doppler Radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Volume 17, Issue 5: 585-594. DOI: 10.1175/1520-0426 (2000)017<0585:ADPRFS>2.0.CO;2
- Keskkonnaagentuur 2020. Radaripiltide intervall on nüüd 5 minutiline. <http://www.ilmateenistus.ee/2020/05/radaripiltide-intervall-on-nuud-5-minutine/> (vaadatud 23.10.2022)
- Keskkonnaagentuur a. Kaugseire. Ilmaradarid <https://www.ilmateenistus.ee/ilmatarkus/mootetehnika/kaugseire/radarid/> (vaadatud 18.05.2023)
- Keskkonnaagentuur b. Sürgavere radar. <https://www.ilmateenistus.ee/meist/vaatlusvork/surgavere-radar/> (vaadatud 24.10.2022)
- Kiitsak, K., 2020. Ohtlikud ilmanähtused Eestis 1997-2019. Bakalaureusetöö.
- Maa-amet, 2016. Aluskaart. ESRI Shapefile vormingus andmefail.
- Maa-amet, 2019. Haldus- ja asustusjaotus. ESRI Shapefile vormingus andmefail seisuga 01.04.2019
- NOAA National Weather Service (NWS). How radar works. <https://www.weather.gov/jetstream/how> (vaadatud 18.05.2023)
- NOAA National Weather Service (NWS) Radar Operations Center, 1991. NOAA Next Generation Radar (NEXRAD) Level 2 Base Data. 20. mai 2013 andmed. NOAA National Centers for Environmental Information. DOI:10.7289/V5W9574V.
- NOAA National Weather Service (NWS) Radar Operations Center, 2022. NEXRAD Technical Information. <https://www.roc.noaa.gov/WSR88D/Engineering/NEXRADTechInfo.aspx> (vaadatud 24.10.2022)
- Púčik, T., Groenemeijer, P., Šinger, M. *et al.* 2022. Surveying and forecasting the violent tornado of 24 June 2021 in southeastern Czechia. 30th Conference on Severe Local Storms.

Abstract. <https://ams.confex.com/ams/30SLS/meetingapp.cgi/Paper/407597> (vaadatud 18.05.2023)

- Ryzhkov, A. V., Burgess D. W., Zrnic D. S. *et al.* 2002. Polarimetric analysis of a 3 May 1999 tornado. 21st Conf. on Severe Local Storms. Extended Abstract.
- Ryzhkov, A. V., Schuur, T. J., Burgess D. W., Zrnic D. S., 2005. Polarimetric tornado detection. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, Volume 44, Issue 5: 557-570. DOI: 10.1175/JAM2235.1
- Sadowski, A., 1960. Spiral Cloud Band Associated with a Tornado. *Science*. Volume 132, Issue 3429: 736-737. DOI: 10.1126/science.132.3429.736
- Servei Meteorològic de Catalunya, Pythoni moodul vcor_dual_prf, https://github.com/meteocat/vcor_dual_prf (vaadatud 18.05.2023)
- Smith, R. L., Holmes D. W., 1961. Use of Doppler Radar in Meteorological Observations. *Monthly Weather Review*, Volume 89, Issue 1: 1-7. DOI: 10.1175/1520-0493(1961)089<0001:UODRIM>2.0.CO;2
- Stout, G. E., Huff, F. A., 1953. Radar Records Illinois tornadogenesis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 34, Issue 6: 281-284.
- Tanilsoo T., Tarkvarapakett TRV. <https://github.com/es5nhc/trv> (vaadatud 24.10.2022)
- Tarand, A., Kallis, A., 2017. Eesti tornaadod. Kirjastus Varrak. ISBN 978-9985-3-4007-3
- The COMET® Program, Weather Radar Fundamentals, Range Folding. http://research.atmos.ucla.edu/weather/C227/Documents/tmp/basic_wxradar/navmenu.php_tab_1_page_3_1_0_type_text.htm (vaadatud 18.05.2023)
- Wakimoto, R. M., Atkins N. T., Buttler K. M. *et al.* 2016. Aerial Damage Survey of the 2013 El Reno Tornado Combined with Mobile Radar Data. *Monthly Weather Review*, Volume 144, Issue 5: 1749-1776
- Wakimoto, R. M., Lee, W. C., Bluestein, H.B., *et al.* 1996. ELDORA observations during VORTEX 95. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Volume 77, Issue 7: 1465-1482. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)077<1465:EODV>2.0.CO;2

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Tarmo Tanilsoo,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose „Tornaadode teke ja elutsükkel Eestis lähtuvalt radariandmetest“,

mille juhendajad on Tanel Voormansik ja Jaak Jaagus,

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 4.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Tarmo Tanilsoo

26.05.2023